

強震観測にかかわる新しい技術

New Technology for Strong-motion Observation

片岡俊一
Shunichi Kataoka

Performance of a latest strong motion seismometer is good enough for engineering purposes. However, many new type instruments that record earthquake motion have been developed. In this paper, outlines of such new instruments are explained at first. Network data transmission system is another key point for earthquake motion recording. Thus secondary, network technology is described.

Keywords: Optical fiber sensor, GPS, Micromachined sensor, Network

光ファイバセンサ, GPS, マイクロマシニングセンサ, ネットワーク

1. はじめに

自然現象である地震が起こすユレは、人間界にとっては被害を引き起こす原因であるので、それを知ることは対策を打つ上で、極めて重要なのである。古くから、このユレを計測するために、強震計が種々開発されてきており、技術の進歩とともに改良がなされている。現状を考えると、市販されている強震計は地震時の構造物あるいは地盤におけるユレを計測し収録するという強震計の最低限の機能は、全て有していると考えられる。

しかしながら、強震観測に様々な技術が導入されセンサーそのものあるいは収録装置が改良されているのも事実である。本報告ではセンサーの紹介とともに、ネットワーク技術を導入したシステムを紹介する。

2. センサーについて

2.1 従来型の拡張

まず、現状の強震計の性能を評価する。K-netがAD変換方式として、従来の逐次比較方式とは異なる $\Delta\Sigma$ 式を採用したことにより¹⁾、その後この方式を用いた強震計が広まった。また、AD変換方式以外にもK-net以降の市販強震計の仕様は、K-netが基本となっており、強震計の新たな仕様を打ち出したと言った意味でもK-netはエポックメイキングなことであったと言えよう。

$\Delta\Sigma$ 式の高分解能を有した強震計では、都心であれば、微動から最大2G程度の加速度まで観測できるようである²⁾。こうしてみると、強震計のうち加速度を計測するものにおいては、分解能や測定可能振動数範囲等の基本性能は工学的に必要な仕様を満たしていると言えよう。

しかしながら、現在でも基本性能のさらなる向上がはかられている。たとえば、東京電力が電力技術研究所に導入した地震観測装置は、メンテナンスフリーを目指し消耗部品を簡素化し、リモートメンテナンスが可能なシステムとし

ている。また、連続観測がほぼ可能な程度の記録容量を有している（東京電力資料）。

一方、速度型強震計はどうだろうか。基盤広帯域地震観測であるFREESIA networkでは低振動数ノイズを押さえた速度型強震計（VSE355R）が新たに導入されている³⁾。VSE355Rは観測最大速度が2m/sとなっており、観測可能な振幅範囲もかなり広がっている。

速度型強震計は、村松が指摘しているように、加速度型強震計に比べて測定周波数範囲が実用上広く、測定すべきダイナミックレンジが加速度、変位に比べると狭いので分解能が高い記録が得られる、という二つの大きなメリットがある。さらに変位波形の再現性がよいことも利点の一つであろう。速度計の加速度計と比較した時の欠点は、取り扱いがやや面倒なことと、一般的に加速度計よりもサイズが大きいこと、価格が高いことが挙げられる。速度を測定するメリットは大きいので、上記の欠点を克服した速度型強震計が望まれる。

2.2 光ファイバセンサー

(1) 光ファイバセンサの特徴

光ファイバセンサは、外力によりファイバガラス内を通過する光の散乱、干渉、減衰などが変化することを利用するもので、今後のセンサとして期待されている。建設分野においても鈴木・Fengの論文⁴⁾を始めとして、様々な検討がなされている。光ファイバセンサの特徴を挙げると以下のようになる。

・電気回路を用いる部分が、収録装置に限るために、雷や電気設備などからの電磁界の雑音に対して影響を受ける恐れがない。

・従来の計測に用いられていたケーブルに代わり、ファイバケーブルを用いることから、重量が軽くなり、湿気による絶縁不良となる可能性が低い

方式によっては、一本のファイバによる多重方式も可能となり、配線処理が楽になる。

今後、光通信がさらに進むとファイバ使用量が増えることから、これまで以上に価格が低下することが考えられる。

光ファイバセンサとしては、光ファイバそのものをセンサとするものと、外部センサの信号を光信号に変えて伝送するものがあるが、ここでは光ファイバそのものをセンサとして利用するものの方、振動計測用に開発されているものを紹介する。

なお、光ファイバセンサを用いた計測システムの方、温度計測は実用の域に達しており⁶⁾、ひずみ計測に関しては実機による試験中⁷⁾といった段階にある。特に、ひずみ計測に関しては構造物のヘルスマニタリングの面からも検討が進められており、本シンポジウムにおいても若干の紹介がなされている⁸⁾。

(2) FBGの利用

FBGセンサ(Fiber Brag Grating Sensor)の機構を図-1に示す。平常時に光をファイバに通過させると Brag grating (ブラッグ格子)により、狭い波長幅の反射光が発生する。この状態で外乱を受けると、格子間隔が変化し、反射光の波長が変化する。FBGセンサは、この波長の変化から格子部分のひずみの量を推定するものである。このセンサの場合、格子間隔を調整することにより、一本のファイバに複数のセンサ部分を設けることができる、つまり多重化が可能である。また、ひずみに変換できる物理量ならばどのような物理量でも計測が可能である、と言った特徴もある。そこで、図-2に示すような機構を有する加速度計が開発されている⁹⁾。

以下に、FBG加速度センサの振動台試験結果を示す。東京測振製のサーボ型速度計VSE-15Dと併設して振動台を3Hzの正弦波で加振した時の結果が図-3である。ブラッグ波長の検出にはMicron Optics社製のFBG-ISを用いた。カタログ上の最高収録振動数は50Hzであるが、パソコンとのインターフェースの制約で34Hzの収録振動数で収録している。VSE-15Dの方は、100Hzサンプリングで加速度を収録した。FBG加速度センサの収録振動数は34Hzと低いものの、時刻歴およびスペクトル特性の両者とも良く合っている。ここでは最大片振幅50Gal程度での加振であるが、FBGセンサは歪み換算で実用上最大で20,000 μ ストレイン程度まで利用可能であるので、広いダイナミックレンジを確保することが可能である。高振動数での収録の可能なFBG収録装置が開発されて市場に提供されつつあるので、そうした装置とこのFBG加速度センサを組み合わせることによって、電気式の振動計測システムに比較して高耐久で信頼性の高い仕組みを実現できる可能性がある。また、多重化が可能なることから、一つの光ファイバ上に振動計とひずみ計を併設し、構造物の健全性を管理するようなシステムも考えられ

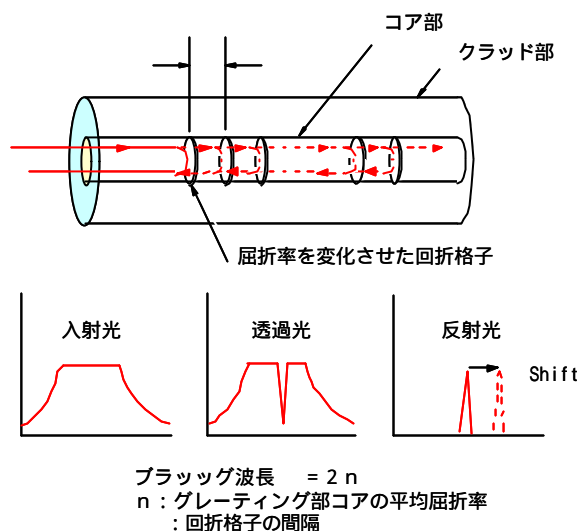


図-1 FBGセンサの仕組み

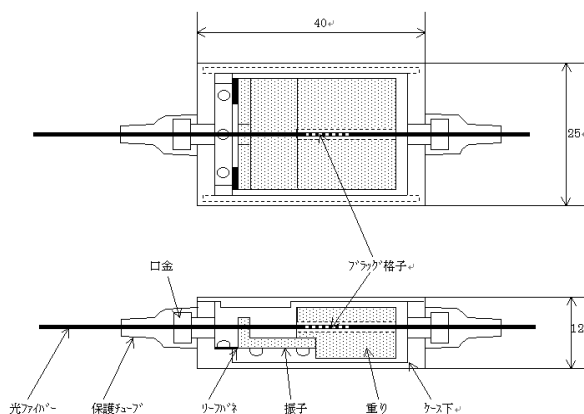


図-2 FBG加速度センサの構造

る。

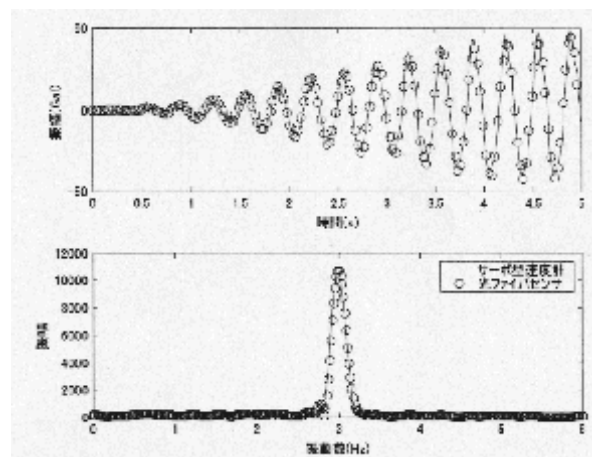


図-3 FBG加速度センサの応答特性

(3) マイケルソン干渉計の利用

マイケルソン干渉計を利用した地震計は、既に実証試験

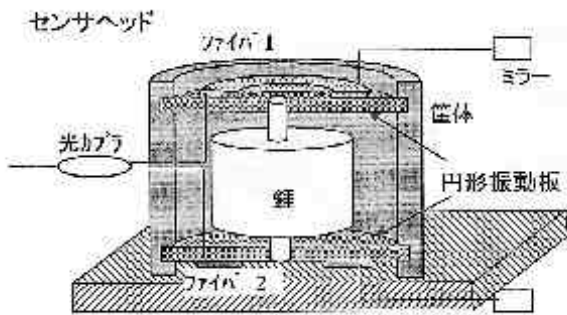


図-4 マイケルソン干渉計を用いた光ファイバ加速度計のセンサヘッド

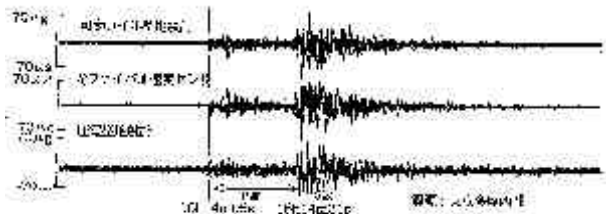


図-5 マイケルソン干渉計を用いた光ファイバ加速度計の記録と従来型の地震計の記録の比較。地震は、1999年11月3日東京都多摩西部の地震。

の段階にある¹⁰⁾。ここで用いられているセンサーヘッド(加速度を感知する部分)の機構を図-4に示す。光ファイバは上下2枚の円形振動板の外側に渦巻き状に取り付けられている。センサヘッドが上下方向に振動すると、錘に振動加速度に比例した慣性力が加わり振動板が曲げ振動する。このとき、上下2枚の振動板は互いに逆位相となり、干渉計の光ファイバの長さ変化が強調され高感度となる。また、温度によるファイバの伸縮はファイバが同一方向に変形するために影響が相殺される。

新藤らは、この加速度センサを従来型の可動コイル型地震計(速度計)L-22Eおよび圧電型地震計(加速度計)と併設し、沼津市内浦湾の海底で地震観測を行っている。図-5は、観測された地震記録の比較の1例であるが、従来型と遜色なく地震記録が得られていることが分かる。また、3台の比較では光ファイバ加速度計が最もノイズレベルが小さいことから、付近で起きた微小地震(気象庁の発表なし)の記録も観測されている。

2.3 マイクロマシンングの利用

木下の報告¹¹⁾にあるように、地震計をIC化する動きがある。これは、いわゆるマイクロマシン技術を利用したものであり、人手をかいさず大量生産が可能のために、大量消費が保証されれば、価格を安くすることができる。例えば、木下の報告にも記載されているが、USGSの調査¹²⁾によれば、1995年の時点で100個納入時の1個当たりの価格が1万円以下というものもある。これだけ低価格になると、ある地域の地震動を観測する「地震動モニタリング」としては非常に

有効な手段である。東京ガスは、管内に3600台(約0.9平方kmに1台)の新SIセンサーを置く予定にしている¹³⁾が、これだけの量のセンサーが設置可能になったのは、センサーの価格が破壊的に(とは、言っても一桁は異ならないようだが)安くなったことも一因であろう。

東京ガスが新たに開発した新SIセンサー¹⁴⁾を図-6に示す。このセンサーは、自動車用に大量生産されている住友精密工業(株)製の静電容量式加速度ピックアップを利用している。また、可動電極の非対称製を利用し、1チップで3軸の加速度が計測可能という特徴を有している。SI(スペクトル強度)は、内蔵されたCPUによりリアルタイムで計算されている。

仕様としては、加速度計測範囲が2000cm/s/s、計測精度は5%、分解能1/8cm/s/s、サンプリング周波数100Hz、波形記録時間はSI最大値を中心に±25秒、計50秒となっており、SI値の大きい波形6地震分を保存する機能も有している。

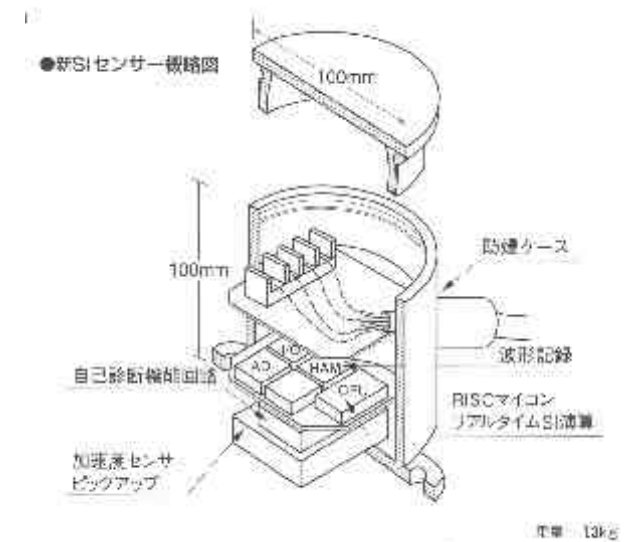


図-6 東京ガスが開発した新SIセンサーの概要図

従来から強震計を作っていたメーカーでも、マイクロマシン技術を利用した強震計の開発を行っている。例えば、アメリカのKinemetrics社はQDRという名称の強震計を製作している(日本における販売は応用地震計測)。この強震計の仕様は、測定範囲:水平動±2G,上下動±1G,AD変換:11bit,周波数範囲:DC~25Hzとなっている。このような強震計は、可動部がないために、保守作業は非常に容易であろう。

目的を絞れば、このように性能は最先端のものに比べて劣るが、価格が非常に安い強震計の用途は多いように思える。前述した、地盤のコレを対象とした地震防災用の地震動モニタリングもそのひとつである。例えば、福和らは、自らが提唱している双方向災害情報システム「安震システム」の端末である「安震君」に、このQDRを取り込んだ利用例を示している⁵⁾。また、このような簡便な強震計の利用先として



図-7 マイクロマシンングを利用した地震計 QDR の外形

は、強震時に限った構造物の挙動の計測あるいは性能保証のための計測などが考えられる。

2.4 その他の技術の導入

(1) 監視用ビデオカメラの利用

堀たちは、観測精度をある程度犠牲にしても、より高密度な観測網を作成することを目的として、銀行やコンビニエンスストアなどに設置されている監視用ビデオカメラを利用して地震動を把握することを検討している⁶⁾。現在利用されている監視用カメラを使用するので、維持管理に手間をかけずに地震観測が実施できることになる。

数人の研究者が監視用ビデオカメラを利用して地震動の特性を検討している。菊池¹⁷⁾は1995年兵庫県南部地震における神戸市内の断層の位置の特定に監視用カメラの画像記録を利用している。久家¹⁸⁾は、同地震でのNHK神戸放送局の室内映像に見られる什器の動きや人の行動と簡単な建屋モデルの地震応答解析結果が良い対応を示すこと示している。これは、映像記録から地震動を推定することが可能であることを示唆している。大堀⁹⁾²⁰⁾はコンビニエンスストアの監視カメラに記録された物の動きや人間の行動を気象庁震度階に照合することで震度調査を試みている。文献16)は、監視カメラが記録したビデオ画像記録から強震動を同定するための画像解析手法と逆解析手法を提案したものであり、それ以前の2つの文献¹⁾²²⁾が基本となっている。監視カメラを利用した強震観測網の特徴を挙げると以下ようになる。

- ・地震観測点より各段に高密度である。
- ・監視カメラは本来の目的のためにメンテナンスされており、強震観測のための維持管理は不要である。
- ・画像として記録されるので、事後においても正確な再現が可能である。

一般に、1/30秒毎に640×480ピクセルのデータが店舗開

店時間の間記録されている可能性が高い。

- ・定量的な強震動推定の可能性がある上に、被写体の振動やその動きにより定性的な検証も可能となる。
- ・カメラは建物についており、被写体によっては地盤のゆれを計測していない可能性がある。
- ・電源が遮断された場合には、記録が残らない。

具体的な監視カメラの利用方法としては、次の3つが考えられている。

- ・標点観測
- ・振り子観測
- ・センサー観測 (音声トラックを利用)

標点観測と振り子観測の概要を図-8に示す。標点観測は、建物の振動により監視カメラが振動することにより、画像内にある幾つかの任意の標点を通して監視用カメラの相対的な動きを計測するものである。振り子観測は、監視カメラに取り付けた幾つかの振り子の動きを画像から追うものである。センサー観測は、小さな振動センサーを監視カメラ内に設置し、センサーの電気信号を変調して、監視カメラの音声トラックに記録するものである。

文献16)によると、監視カメラをせん断型の一層フレームに固定した上で、正弦波加振の振動台実験を行った結果、振り子型観測から逆に加振波を推定したところ、振幅、振動数とも誤差10%程度であった。この研究によりこれまで定性的に用いられた監視ビデオの画像が定量的に使用できる可能性が示されたと言える。

(2) GPSの利用

現在では、GPSを用いた測量が大規模な建設工事にお

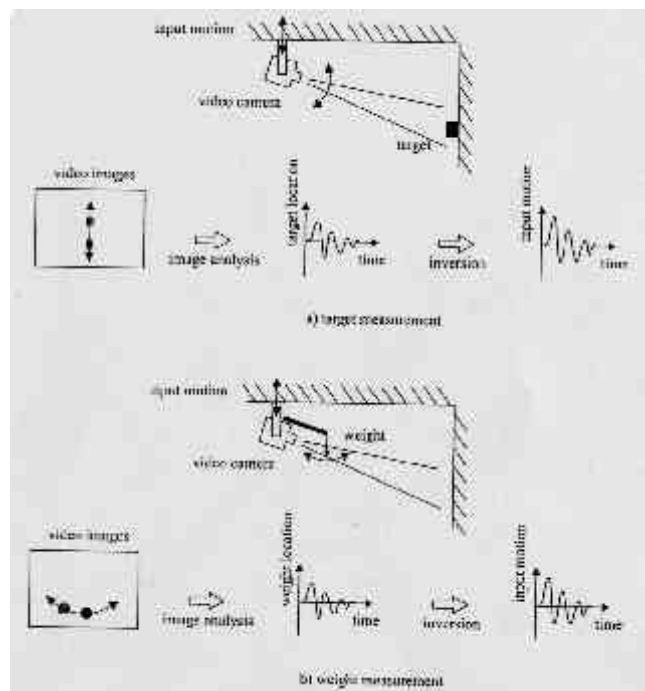


図-8 監視用ビデオカメラを用いた地震動推定の概念図。(a)標点観測、(b)振り子観測

いて行われている。GPS測量に用いる受信機や処理ソフトは販売されており、一般のユーザーはそれを購入すれば直ぐに利用可能である。そこで、外乱に対する構造物の相対変位応答をGPSで計測する試みが橋梁²³⁾、高層建物²⁴⁾、²⁵⁾を対象に検討されている。このような構造物は、風圧により準静的に変形しており、従来型のセンサでは相対変位を求めることが容易でないと言った特徴がある。

ここで用いられている計測方法は、リアルタイムキネマチック (RTK-GPS) と呼ばれるもので、基準局と振動している移動局にGPSを設置し、移動局で観測された衛星からの信号を基準局に電送し(無線でも有線でも可)、基準局において搬送波位相解析を行うことで、位置を算出する。精度は1cm程度であり、位置の計算タイミングは10Hzである。文献18)によると、概ね2Hz以下の固有振動数の建物が振幅2cm程度以上で振動する場合に計測可能とのことである。この精度は、現状のRTK-GPSの精度が1cmであることから決まっていると思われる。現状のGPS-RTKの性能であれば、振動だけを対象にすると、分解能が高い加速度計と同程度の性能となってしまうので、今後のGPSの高精度化が期待される。あるいは、取り扱いが比較的簡便なGPSの特徴を生かした新たな防災システムを考えることが必要となってくる。

3. ネットワークへの対応

ここ数年で社会は、急激な勢いでネットワーク社会となってきた。ネットワークの技術を使うと、地震記録の収集、整理、公表・公開が非常に簡便になる。そこで、以下にネットワーク技術を利用した地震観測システムを紹介する。

データのリアルタイム(に近い)転送は、広帯域地震観測では以前から行われている³⁾。強震動については、東北工業大学の神山が仙台地区で開始した²⁶⁾。これは、仙台地区の20箇所地表に設置した強震計と東北工業大学に設置されたセンターとを公衆ISDN回線で結び、地震動感知後3分以内に全地点の観測データを回収完了する仕様で設計されている。強震計の仕様は、ほぼK-net95と同等あるいはその上位となっている。

強震計が自らデータを発進するシステムは、名古屋大学で試みられたもの²⁷⁾、²⁸⁾が最初の公表例であろう。このシステムでは、強震計とRS-232Cで結ばれたパソコン上でTCP/IPプロトコルが動作し、これによりデータ発信を行っている。機能の切り分けという面では、強震計とPCを分けて置くことは有利であるが、高速の学内LANを使用しているにもかかわらず、転送速度が強震計とPCの間の転送速度で制限されてしまうのが欠点である。なお、最近ではPCの代わりにLANアダプタを用いている²⁹⁾。LANアダプタは、シリアルポートのプロトコルをTCP/IPのプロトコルに変換するもので、これにより共振計が直接LANにつながるようになる。

最近では、様々な通信手段を用いて強震観測ネットワー

クが組まれている。たとえば、松下らは高層建物における強震観測を建物内LANに直接繋いだ強震計およびPHS、携帯電話でWebサーバーに繋いだ強震計で構成している³⁰⁾。同様な試みは、東京電力でも行われている(東京電力資料)。文献29)にあるように、福和・飛田は種々の情報伝達手段を用いて高密度強震観測網を構築している。

このように、ネットワークを利用した強震計網は、実用の域に来ている。改めてネットワーク技術を利用した際の利点をあげると次のようになる。まず、記録の自動取り込みが可能となり、その際にユニークなファイル名がつけられることから、自動的にデータベースが構築されることになる。また、時刻データの共有が可能になるので複数地点の強震計の同期起動の確保が可能となり、単独に設置されていた強震計もアレー観測網の一部となり得る可能性が出てくる。一方、現状ではセンサーと収録部分を分けた場合、両者の間はかなり太いケーブルが介在し、この引き回しにかかる労力もかなりのものであるが、前述したLANアダプタを用いることでケーブル敷設の労力が削減される。このように、可能性は大いにあるので、今後の強震計は、ネットワークを意識したものになるであろう。

4. まとめ

現在の強震計の性能は、工学的目的を果たすには十分と考えられる。しかしながら、様々な目的を持ち新たな技術を導入した地震計が開発されている。本報告では、このような新しい技術を導入した地震計を紹介した。つまり、光ファイバセンサを利用した振動計や監視用ビデオカメラを利用した地震動計測システム、GPSを利用した相対変位計測の試みである。また、今後の地震観測を考えると、ネットワークとの親和性が重要である。そこで、ネットワークを利用した最新の観測システムを紹介した。

このように地震観測の技術は着実に進歩している。そこで、今考えるべきことは地震観測の意味であろう。地震が起こすコレを知ることは対策を打つ上で、極めて重要なことであるので、地盤における地震観測は非常に重要なことである。これについては、K-netやKiK-Netなどにより日本全土を均質に覆っている観測網ができており、今後データおよび解析の充実を待つことになる。

一方、構造物を対象とした観測はどうだろうか。現状の観測では、建物全体系の振動特性(固有振動数、固有モード、減衰定数)を把握するのが精一杯である。しかしながら、極論すれば、これらのパラメータが設計に影響を与えとは言えない。地震時の建物性能を保証すると言ったときに、このような現状で良いのであるか。設計法と密接な連関を取って地震観測を実施する必要があるように思われる。

参考文献

- 1) 木下繁夫・上原正義・斗沢敏雄・和田安司・小久江洋輔：K-NET型強震計の記録特性，地震2，第49巻，467-481，1997。
- 2) 川瀬博・佐藤智美・工藤一嘉・高橋正義・神野達夫：JEP-6A3強震計とVSE11/12 速度計，およびAltus K2との微動計測特性の比較，機動強震アレイ観測のための計量小型強震計の製作と観測・解析マニュアルの製作，平成7年度～平成9年度科学研究費補助金[基盤研究(A)]研究成果報告書，研究代表者工藤一嘉，60-96，1998。
- 3) 福山英一，石田瑞穂，堀貞喜，関口渉次，綿田辰吾 Freesia Projectによる広帯域地震観測，防災科学技術研究所研究報告，57，23-31，1996。
- 4) 鈴木英世，Maria Q. Feng：構造物の計測のための光ファイバを用いたセンサの開発について，土木学会論文集，No.528/VI-29，7-15，1995。
- 5) 鈴木弘昭：光ファイバを用いた新しい火災感知システム SUT Bulletin，46-51，1999。
- 6) 例えば，虎谷和幸，近藤睦，山川祐司，三田彰：分布型光ファイバ温度センサを利用した地下式LNGタンク底版コンクリートの施工管理，土木学会第52回学術講演会概要集VI，50-51，1997。
- 7) 例えば，熊谷仁志，三田彰，岡公隆，大野博重：コンクリート構造物用光ファイバセンサの開発と実証，コンクリート工学，Vol.38，No.7，17-21，2000。
- 8) 中村充，若松邦夫：ヘルスマニタリングと地震観測 - 建物の耐震健全性評価につながる強震観測の活用 - ，第2回強震データの活用に関するシンポジウム，日本建築学会，2000。
- 9) 三田彰，片岡俊一：ヘルスマニタリング用F B G加速度センサおよび圧力センサの特性評価，日本建築学会大会学術後援会概要集(東北)，B-1，771-772，2000。
- 10) 新藤雄吾，吉川隆，土橋孝治，濱田顕尚，三ヶ田均：光ファイバ加速度センサによる海底地震観測，海洋音響学会講演論文集，107-110，2000。
- 11) 木下繁夫：サーボ型地震計，地震2，総合報告，第50巻，471-483，1998。
- 12) Evans, J. R. and Rogers, J. A.: Relative performance of several inexpensive accelerometers, USGS Open-file report 95-555, 38p.
- 13) 清水善久：東京ガスの新リアルタイム地震防災システム - SUPREME - と今後の展望，第1回リアルタイム地震防災シンポジウム論文集，土木学会，13-18，1999。
- 14) 小金丸健一，清水善久，築田貴，古川洋之，田久保光：新SIセンサーの開発，土木学会第53回年次学術講演会，I-426，p.852-853。
- 15) 福和伸夫，高井博雄，飛田潤：双方向災害情報システム「安震システム」と携帯型災害情報端末「安震君」，日本建築学会技術報告集(印刷中)，2000。
- 16) Hori Muneo, Sutoh Atsushi, and Saitoh Yoshihide: Strong motion measurement using security video cameras, J. Struct. Mech. Earthquake Eng. JSCE, No.647/I-51, 47-56, 2000.
- 17) Hori Muneo, Sutoh Atsushi, and Saitoh Yoshihide: Strong motion measurement using security video cameras, J. Struct. Mech. Earthquake Eng. JSCE, No.647/I-51, 47-56, 2000.
- 18) 久家英夫，瀬尾和夫，佐間野隆憲：兵庫県南部地震における地震時挙動とビデオ画像との対応について，日本建築学会大会学術講演概要集，207-208，1995。
- 19) 大堀道広，奥田暁，若松邦夫，安井謙：コンビニエンスストアを対象としたアンケート震度調査の試み - 1994年10月4日北海道東方沖地震を例題として - ，日本建築学会構造系論文集，No.478，71-79，1995。
- 20) 大堀道広，奥田暁，若松邦夫，安井謙：コンビニエンスストアの防犯カメラが記録した1994年10月4日北海道東方沖地震，地震2，48，423-427，1995。
- 21) 須藤敦史，堀宗朗，斉藤芳人：画像記録を利用した地震動同定システムの基礎検討，第24回地震工学研究発表会，土木学会，1997。
- 22) 斉藤芳人，堀宗朗，須藤敦史：画像記録による地震動同定に関する振動台試験，第24回地震工学研究発表会，土木学会，1997。
- 23) 中村俊一，坂本良文，並木厚，渋谷元：GPSを用いた強風時における吊橋補剛桁の変位観測の報告，第15回風工学シンポジウム，245-250。
- 24) 田村幸雄，松井正宏，内山雅之，日比一喜，石原競：GPSを利用した高層建築群の風応答観測の可能性 - 都市防災システムの構築を目指して - ，日本建築学会大会学術講演概要集(中国)，B-1，203-204，1999。
- 25) 石原競，Luis-Carlotta Pagnini，松井正宏，石橋龍吉，田村幸雄：GPSを利用した建物の風応答計測に関する基礎的研究，日本建築学会大会学術講演概要集(東北)，B-1，211-212，2000。
- 26) 神山眞：宮城県仙台地区，平成10年度ローカルサイトエフェクト・シンポジウム論文集，土木学会地震工学委員会，63-68。
- 27) 小出栄治，福和伸夫，山田耕司，石田栄介，西山拓一，飛田潤：学内LANを活用した名古屋大学における振動観測・分析システムの構築，日本建築学会情報システム技術委員会，第19回情報システム利用技術シンポジウム，1996。
- 28) 福和伸夫，山田耕司，石田栄介，森保宏，辻本誠，松井徹哉：オンライン強震観測・地震被害想定・振動実験システムの構築，日本建築学会技術報告集，第3号，41-47，1996。
- 29) 福和伸夫，飛田潤：建物・地盤の動的相互作用から見た強震観測，第2回強震データの活用に関するシンポジウム，日本建築学会，61-72，2000。
- 30) 松下剛史，土肥博，稲葉拓，奥田賢持：情報通信技術を利用した地震観測システムの構築，日本建築学会大会学術講演概要集(東北)，511-512，2000。